

# ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ПЛАСТИН ПРИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКЕ КОРРОЗИОННОСТОЙКОЙ СТАЛИ И ТИТАНОВОГО СПЛАВА

## EXPERIENCE OF USING OF THE INTERMEDIATE PLATE IN LASER WELDING OF STAINLESS STEEL AND TITANIUM ALLOY

Н.Б. Пугачева, Н.С. Мичуров  
ИМАШ УрО РАН, г.Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34.  
[n.michurov@gmail.com](mailto:n.michurov@gmail.com)

### Abstract

*Considered the effect of the intermediate plates for welding dissimilar difficult-to-weld materials in terms of stainless steel 12X18H10T (12H18N10T) and titanium alloy BT1-0 (VT1-0). Defined the effect of additives nanopowder on the structure and properties of welded joint.*

### ВВЕДЕНИЕ

Особые физико-химические свойства титана – высокая активность в расплавленном состоянии по отношению к кислороду и водороду, низкая теплопроводность и теплоемкость, повышенное электросопротивление – обуславливают определенные трудности при лазерной сварке. Наиболее опасно появление холодных трещин, которые могут возникнуть как сразу после сварки, так и в процессе длительного хранения. Нередко возникает необходимость осуществления сварки титанового сплава с конструкционной сталью. При этом возникает ряд технологических сложностей, связанных с существенными различиями теплофизических свойств

соединяемых материалов. Проплавление титановых сплавов происходит гораздо интенсивнее по сравнению со сталями. При лазерной сварке конструкций из нержавеющей стали наиболее опасна химическая неоднородность шва, которая может служить основной причиной снижения механических свойств и стойкости к образованию холодных трещин. Для получения качественных швов при сварке титанового сплава с нержавеющей сталью перспективным представляется использование некоторых промежуточных слоев, позволяющих сгладить различия между соединяемыми материалами.

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Сварку листов толщиной 3 мм из титанового сплава BT1-0 и нержавеющей стали 12X18H10T проводили с помощью CO<sub>2</sub> лазера. В качестве переходных материалов, участвующих в формировании сварного шва, использованы пластины из меди, никеля, нихрома, припоя ПСр 72 на основе серебра и меди, а для упрочнения медной прослойки – тантал. Методами оптической металлографии (микроскоп НЕОРНОТ 21), а также с помощью растрового электронного микроскопа TESCAN VEGA II XMU (Чехия), оснащенного системами рентгеновского волнодисперсионного микроанализа INCA WAVE 700, энергодисперсионного микроанализа INCA ENERGY 450 с ADD детектором фирмы OXFORD

(Великобритания) и программным обеспечением INCA исследованы микроструктура, распределение элементов, локальный химический состав материала сварных швов и прилегающих к ним диффузионных зон. Фазовый состав сварных швов определяли с поверхности поперечных шлифов на рентгеновском дифрактометре Shimadzu в  $k_\alpha$  излучении хрома. Измерения микротвердости по сварному шву проведены на приборе LEICA VMHT AUTO (Германия) при нагрузках от 10 до 50 г. Испытания на статическое растяжение – на сервогидравлической испытательной машине INSTRON 8801.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Во всех сварных швах обнаружено интенсивное диффузионное взаимодействие соединяемых материалов с дополнительными прослойками. При использовании медной пластины в качестве промежуточного слоя на границе с нержавеющей сталью и титановым сплавом образуются диффузионные зоны, которые способствуют плавному перераспределению свойств между соединенными материалами. Через расплав происходит диффузионное перераспределение титана до нержавеющей стали, и железа – до титанового сплава. На границе с титановым сплавом диффузионная зона содержит от 20 до 56 мас. % титана, от 3 до 22 мас. % железа, около 1,5 мас. % никеля, около 1,5 мас. % хрома

и от 30 до 72 мас. % меди (причем, это минимальные значения концентрации меди по ширине сварного шва). По данным локального химического анализа эта диффузионная зона образовалась, главным образом, за счет растворения меди в титане, что привело к увеличению параметров решетки последнего. Диффузионная зона на границе с нержавеющей сталью представляет собой твердый раствор меди и титана в железе, параметр решетки аустенита при этом увеличился на 0,1 Å по сравнению с основной конструкционной сталью. Концентрация железа по толщине диффузионной зоны уменьшается при удалении от границы с нержавеющей сталью до 48 мас. %, хрома – до 10 мас. %, меди – до 30 мас. %.

никеля до 4 мас. %, а меди и титана увеличивается до 17 и 13 мас. %, соответственно. Наиболее однородные по химическому составу швы образуются при использовании пропановой горелки (рисунок 1.а), значения микротвердости такого шва – около 3,5 ГПа. Стандартные режимы лазерной сварки приводят к формированию более неоднородных по химическому и фазовому составу швов, в которых

присутствуют крупные (около 0,4 мм в диаметре) зерна твердого раствора на основе меди с микротвердостью 2 ГПа (рисунок 1.б) и интерметаллиды  $TiCu_3$  и  $TiFe_2$  с микротвердостью 7 ГПа. Временное сопротивление шва с мелкодисперсной структурой составило 455 МПа, это на 26 % выше по сравнению с крупнозернистыми ( $\sigma_b=335$  МПа).

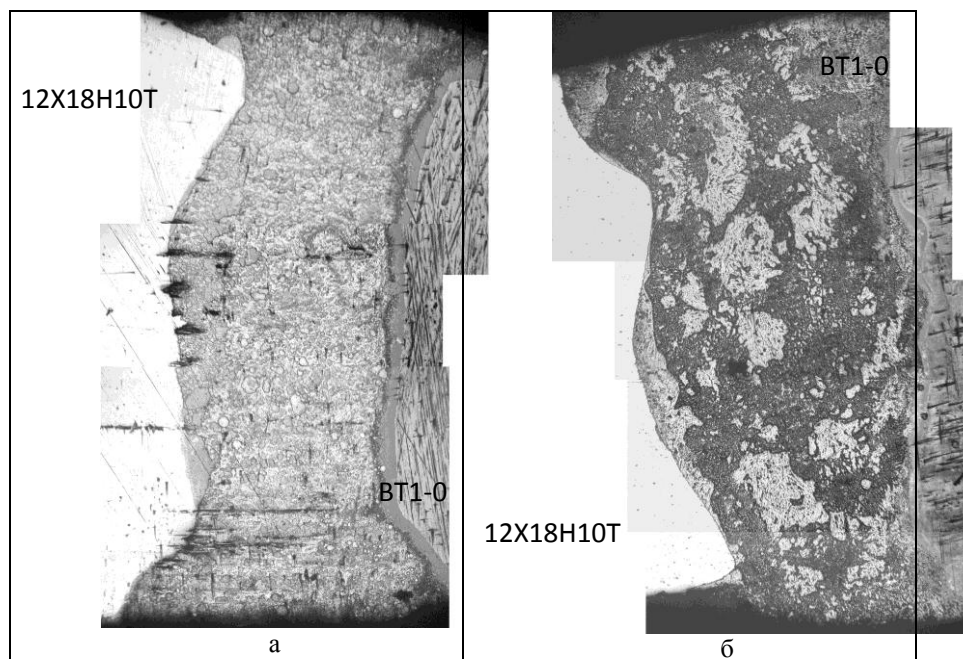


Рис. 1 – Микроструктура сварных швов с промежуточной медной пластиной: а - мелкодисперсная структура после использования пропановой горелки; б – крупнозернистая структура шва

Дополнительное упрочнение в неразъемном соединении удастся получить при введении в сварочную ванну специально подготовленного нанодисперсного порошка. Каждая наночастица становится потенциальной затравкой для зарождения новой фазы (кристалла, интерметаллического или химического соединений и др.). Благодаря этому в расплаве в процессе его охлаждения формируется мелкодисперсная глобулярная структура с равномерным распределением значений микротвердости и повышенной прочностью. Временное сопротивление шва, полученного с промежуточной пластиной меди и нанопорошками  $TiN, Y_2O_3$  и  $Cr$ , составило 375 МПа, т.е. на 15 % выше, чем у соединения без нанопорошков.

При использовании ПСр 72 в качестве переходного слоя получен максимально однородный по химическому составу и структуре, мелкодисперстный по строению сварной шов толщиной всего 0,6 мм. Основу составляет твердый раствор цинка, меди и титана в серебре, в котором выделились дисперсные интерметаллиды  $Ti_2Cu_3, TiCu_3, TiNi_3, TiNi, TiCr_2, TiFe_2, TiAg$ . Значения микротвердости в середине шва около 3 ГПа. На границе с титановым сплавом образовалась ровная по высоте образца диффузионная зона толщиной 20 мкм, представляющая собой твердый раствор элементов в титане и микротвердостью 6 ГПа. На границе с нержавеющей сталью диффузионная зона прерывистая, мак-

симальная толщина её составляет 30 мкм, а состоит она из твердого раствора меди, никеля, хрома, титана и цинка в железе, имеет микротвердость 5,5 ГПа. Значения временного сопротивления на 5 – 10 % выше по сравнению со швом с медной пластиной. Дисперсные интерметаллиды оказывают упрочняющее влияние в материале зоны неразъемного соединения.

Использование нихрома в качестве промежуточного материала малоэффективно, поскольку нихром не растворился полностью в сварочной ванне и не перемешался с основной массой сварного шва, на границе с титаном образовалась трещина, структура сварного шва – литая, с развитой сетью дендритов и микропористостью. При использовании никелевой пластины даже двухсторонняя сварка не устранила неоднородность по содержанию никеля и пористость соединения. Пластина тантала, использованная для упрочнения промежуточного медного слоя, не полностью растворилась при лазерной сварке, поэтому шов получился неоднородным по составу, значения микротвердости зоны практически чистого тантала составили 9 ГПа, а основной части шва – 3 ГПа. При испытаниях на растяжение образец порвался по этой зоне, временное сопротивление составило всего 215 МПа, что на 35 % ниже по сравнению со швом, полученным при использовании только медной пластины, с крупнозернистой структурой, представленным на рис. 1б.

## ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показали перспективность использования для лазерной сварки трудно свариваемых материалов - титановых сплавов с нержавеющей сталью - медных пластин и припоя на основе серебра и меди. Отмечено интенсивное диффузионное взаимодействие соединяемых материалов и элементов прослоек, обеспечивающее плавное изменение микротвердости по ширине сварного шва, а также прочное соединение листов. Дисперсные частицы интерметаллидов оказывают упрочняющее действие.

Работа выполнена при поддержке совместного проекта № 12-С-1-1026 «Создание научно-технологических основ применения лазерного излучения при сварке разнородных металлов и сплавов», выполняемого в ИМАШ УрО РАН (г. Екатеринбург) и ИТПМ им. С.А. Христиановича СО РАН (г. Новосибирск).

## Список литературы

1. Григорьянц, А.Г. Лазерная техника и технология. В 7 кн. Кн. 5. Лазерная сварка металлов / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов; Под ред. А.Г. Григорьянца. – М.: Высшаяшк., 1988. – 207 с.
2. Шоршоров М.Х. Металловедение сварки стали и сплавов титана. / М.Х. Шорохов - М.: Наука, 1965. – 336 с.
3. Пугачева, Н.Б. Прочность и структура неразъемных соединений титана и аустенитной стали, полученных лазерной сваркой с промежуточными слоями / Н.Б. Пугачева, С.В. Смирнов, Д.И. Вичужанин и др.// Деформация и разрушение материалов. 2012. № 7, с. 26 – 33.
4. Пугачева Н.Б., Структура сварных швов стали 12Х18Н10Т и титанового сплава ВТ1-0 с промежуточной медной пластиной после лазерного проплавления / Н.Б. Пугачева, Е.Б. Трушина, Е.И. Пугачева и др.// Вопросы материаловедения, 2013, № 1 (73), с. 166 – 174.